Avant-propos

Dans son histoire, l'homme a appris à transformer et à perfectionner les aliments, matériaux, produits qu'il trouvait dans son environnement. Ces activités, à l'origine très artisanales, se sont en permanence développées et ont donné naissance à plusieurs branches de l'industrie actuelle, l'agroalimentaire, la production de matériaux, la pharmacie et la chimie, pour ne citer que les plus importantes.

Pour l'essentiel, les transformations que cette première catégorie[1] de secteurs industriels fait subir à la matière sont de natures physique (par exemple, solidifier de l'eau pour fabriquer de la glace), chimique (par exemple, réduire l'oxyde de fer en fer dans un haut-fourneau) ou biochimique (par exemple, organiser la fermentation de jus de raisin pour fabriquer du vin). La spécialité scientifique qui conçoit, fait fabriquer puis exploite les appareils, unités de production et usines nécessaires pour réaliser toutes ces opérations industrielles s'appelle le génie des procédés – avec diverses sous-spécialités : le génie chimique, le génie agroalimentaire, le génie biochimique, le génie de l'élaboration de matériaux, etc.

Fabriquer un produit nouveau – matériau, médicament, aliment, engrais, peinture, etc. – demande, généralement, de mettre en œuvre une série plus ou moins complexe d'opérations différentes. Quelle que soit la nature de cette série et quel que soit le mode de production retenu – continu ou discontinu[2] –, les procédés mis en œuvre imposent inévitablement, de manipuler des quantités importantes de matière : réceptionner et stocker les matières premières, les transporter vers le premier appareil de l'unité puis amener les courants de sortie du premier appareil vers le second et ainsi de suite jusqu'au dernier, stocker puis évacuer les produits finis ou les déchets, etc. Le spécialiste de génie des procédés doit connaître les procédures de transport que nous venons d'évoquer. Lorsque la matière est en état fluide, gaz ou liquide, la base scientifique qu'il doit étudier est la mécanique des fluides.

Les matières premières ne sont presque jamais stockées à la température correcte pour entrer dans le premier appareil de l'unité. La température de sortie d'un appareil correspond rarement à celle d'entrée dans l'appareil suivant. En conséquence, les unités industrielles comprennent généralement un grand

1. Il existe une deuxième catégorie d'activités industrielles, de nature davantage mécanique, dont le rôle est de mettre en forme puis d'assembler diverses pièces pour fabriquer les objets complexes que le monde moderne utilise. On peut citer les industries aéronautiques, automobiles, navales, électroniques, électroménagères, etc.
2. Quelques informations générales sur ces deux modes de production industrielle seront fournies tout au long de ce livre et, en particulier, dans les chapitres 18 et 19.

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

nombre de dispositifs dont le rôle est de modifier la température des courants. Le spécialiste de génie des procédés doit correctement maîtriser les lois des transferts de chaleur.

Enfin, rappelons que l'objectif du génie des procédés est de fabriquer des produits nouveaux. Comme les réactions chimiques ou biochimiques qu'il met en œuvre ne sont jamais ni parfaitement sélectives ni totales, les courants qui sortent des réacteurs sont des mélanges complexes des produits recherchés, de sous-produits et de réactifs non transformés. Ces mélanges doivent alors être séparés en chacun de leurs constituants, puis chaque constituant doit être purifié jusqu'à obtention de la composition nécessaire pour son utilisation ultérieure. Le spécialiste de génie des procédés doit correctement maîtriser les lois de comportement d'une espèce dans un mélange dont la composition change dans l'espace et le temps, autrement dit les lois du transfert de matière.

Pour des raisons qui apparaîtront progressivement à la lecture de ce livre, il est d'usage de réunir les trois thèmes que nous venons d'évoquer, la mécanique des fluides qu'on appelle aussi transfert de quantité de mouvement, le transfert de chaleur et le transfert de matière sous le titre général de phénomènes de transfert ; ce livre en présente les lois générales ainsi qu'un grand nombre d'exemples de mise en œuvre en génie des procédés.

Depuis la parution, en 1960, de l'ouvrage pionnier de R.B. Bird, W.E. Stewart et E.N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, auquel nous ferons souvent référence, de nombreux autres manuels ont été consacrés à l'analyse des phénomènes de transfert. Pourquoi alors encore un nouveau livre ?

La première raison, très générale, est que l'ensemble des connaissances scientifiques et techniques, de même que les performances des outils de calcul, ne cessent de progresser. Ces progrès permettent aux spécialistes de génie des procédés de remplacer progressivement les méthodes empiriques ou semi-empiriques, longues et coûteuses, auxquelles ils ont dû faire appel faute de mieux, par des combinaisons d'analyses théoriques et de traitements numériques, plus rapides, plus précis et plus économiques, réduisant ainsi le recours à l'empirisme.

Cette évolution des pratiques professionnelles oblige naturellement les organismes de formation à ajuster le contenu de leurs programmes. Ce livre, dont les auteurs et coordonnateurs sont deux professeurs de l'École nationale supérieure d'ingénieurs en arts chimiques et technologiques (ENSIACET) de l'Institut national polytechnique de Toulouse (INPT) et un professeur du département Génie des procédés et de l'environnement de l'Institut national des sciences appliquées de Toulouse (INSA), propose une analyse des phénomènes de transfert adaptée aux besoins actuels de la profession et qui s'efforce d'anticiper sur les évolutions à court ou moyen terme.

D'autres raisons vont également apparaître dans la suite de cette introduction.

Cet ouvrage est organisé en deux grandes parties.

La première partie présente les lois générales des phénomènes de transfert.

Les spécialistes savent que ces lois peuvent être exprimées et utilisées à deux échelles différentes, soit à celle d'une unité, d'un appareil ou d'une portion d'appareil – on dit que l'analyse est globale – soit à celle d'un élément de volume

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

au sein du fluide – on dit que l'analyse est locale. La plupart des ouvrages antérieurs débutent par la présentation de l'analyse locale et n'abordent les lois globales qu'après. L'avantage d'une telle organisation tient en sa cohérence scientifique puisque les lois globales sont obtenues par intégration des lois locales. L'inconvénient de cette manière de procéder est qu'elle oblige à aller du compliqué, le local, vers le simple, le global.

Une des options importantes adoptées pour rédiger ce livre a été d'inverser cette organisation traditionnelle et, donc, de commencer par l'étude des lois globales et de finir par l'analyse locale. Cette procédure permet de familiariser les lecteurs avec le sujet en limitant les premières présentations à des questions relativement simples, et de n'aborder les thèmes plus délicats que dans une deuxième phase d'étude, avec l'acquis d'un niveau de compréhension déjà solide. En outre, cette manière de procéder correspond bien à la pratique du métier, dans laquelle l'ingénieur commence toujours par de premières investigations de nature globale et n'entreprend qu'ensuite, et uniquement si elles s'avèrent nécessaires, un certain nombre d'études à l'échelle locale. L'inconvénient de ce plan est qu'un certain nombre des lois ou équations globales présentées au début ne peuvent pas être démontrées et doivent être admises. Plusieurs années de pratique nous permettent cependant d'affirmer que les avantages de cette nouvelle organisation l'emportent très largement sur ses inconvénients.

Mise à part l'innovation pédagogique importante que nous venons de décrire, le programme que nous avons retenu pour la première partie du livre reste relativement classique.

Cependant, pour tenir compte des évolutions des pratiques professionnelles, que nous avons évoquées, nous avons tenu à renforcer la présentation de certains thèmes d'analyse locale, la turbulence, par exemple, puis à aborder deux sujets, rarement traités à ce niveau, la diffusion multiconstituant et les milieux diphasiques. Enfin, nous avons rédigé un chapitre intitulé « Du local au global », qui reprend, *a posteriori*, toutes les démonstrations des lois globales qui n'ont pas pu être développées lors de leur présentation compte tenu du choix d'organisation pédagogique effectué. Cela permettra au lecteur, soucieux de rigueur scientifique, de comprendre l'origine de l'établissement de ces lois, et de les réviser au passage.

Si étudier les phénomènes de transfert constitue un prérequis indispensable à la formation d'un spécialiste de génie des procédés, il est évident que ce n'est pas suffisant. En effet, la résolution des problèmes que l'on rencontre industriellement exige de savoir combiner ces concepts avec d'autres, plus spécifiques, et de résoudre toutes les équations correspondantes dans des géométries complexes et des conditions particulières. Or, bien souvent, les exemples d'application des lois de transfert dans nombre de manuels se limitent à des cas, certes d'intérêt didactique, mais finalement de portée pratique moindre. Nous avons souhaité inverser cette tendance.

En conséquence, nous avons voulu donner une certaine importance à la présentation des applications, en y consacrant toute la seconde partie de notre livre et nous avons choisi de l'organiser sous forme de rubriques professionnelles.

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

Chacun des chapitres correspondants précise la nature du problème examiné, indique la ou les solutions que le génie des procédés utilise et, enfin et surtout, détaille les modalités de traitement des phénomènes de transfert mis en jeu.

Le développement de chaque sujet a été poussé de manière très variable.

Sans que nous n'ayons jamais prétendu à l'exhaustivité dans un livre de nature généraliste comme celui-ci, certains thèmes ont été traités de manière assez détaillée ; c'est, par exemple, le cas de tous les sujets qui concernent la mise en mouvement des fluides. D'autres rubriques ont fait l'objet d'une présentation beaucoup plus limitée comme, par exemple, celle relative aux échanges et échangeurs de chaleur ; dans la plupart des cursus universitaires, cette question fait l'objet d'un cours spécialisé, dit de génie thermique, et nous avons choisi de nous limiter à une première présentation de problèmes qui sont approfondis ailleurs. Enfin, certaines rubriques sont si importantes pour le génie des procédés et sont tellement traitées en détail par ailleurs dans les programmes universitaires que nous les avons à peine évoquées ici, parfois sans même leur consacrer un chapitre spécial ; c'est le cas, par exemple, du génie des réacteurs[3].

Bref, nous avons tenté d'organiser cette seconde partie, d'abord pour familiariser le lecteur avec l'utilisation des lois des phénomènes de transfert, ce qui constitue notre but principal, mais ensuite pour lui fournir un premier ensemble d'informations sur l'organisation du génie des procédés et les procédures et techniques principales que cette spécialité utilise, ensemble qu'il enrichira progressivement tout au long de son apprentissage.

Un mot, pour terminer, sur le mode d'emploi que nous suggérons.

Le plan que nous avons adopté, qui sépare l'exposé des lois et le développement des exemples d'utilisation, ne permet pas toujours de percevoir parfaitement le lien entre les deux parties de ce livre ; nous devons ajouter que certaines applications de la seconde partie exploitent, simultanément, des méthodes ou équations tirées de plusieurs chapitres différents de la première partie.

C'est pour atténuer cet inconvénient que nous avons décidé de terminer chaque chapitre de la première partie par un paragraphe intitulé « À propos des applications », qui renvoie aux chapitres pertinents de la seconde partie, puis de commencer chaque chapitre de la seconde partie par un paragraphe intitulé « Position du problème et cadre théorique » qui indique quelles méthodes, lois ou équations de la première partie vont être utilisées et rappelle dans quels chapitres elles ont été présentées.

Ce double quadrillage devrait permettre aux lecteurs d'organiser leur consultation au mieux de leurs besoins.

Ce livre a été conçu, essentiellement, pour l'enseignement à des néophytes. Pour ce public, nous suggérons de commencer par la lecture de la première partie. Ce n'est qu'après avoir étudié les quatre premiers chapitres, qui traitent de l'analyse globale des systèmes isothermes et à composition constante, que le va-et-vient avec les applications de la seconde partie pourra valablement commencer. Il va, ensuite, devoir être poursuivi jusqu'à la fin de l'étude. Nous

3. *Génie de la réaction chimique*, de D. Schweich, Éditions Tec & Doc, Lavoisier, 2001.

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit

pouvons préciser, ici, qu'à notre avis, la matière développée dans la première partie doit plutôt faire l'objet d'une présentation en cours, alors que celle qui a été rassemblée dans la seconde partie correspond davantage aux caractéristiques de séances de travaux dirigés, au cours desquelles l'enseignant présenterait rapidement la nature du problème et les caractéristiques des méthodes ou techniques qui permettent de le résoudre, avant de proposer aux étudiants le ou les exercices nécessaires pour les rendre opérationnels.

Ce livre a été conçu afin de donner la formation en phénomènes de transfert la plus solide qu'il soit raisonnable d'envisager, à notre avis, pour un spécialiste en génie des procédés.

Cependant, parce que les besoins industriels sont variés, beaucoup d'universités inscrivent à leur programme plusieurs cursus différents, certains mettant davantage l'accent sur la connaissance chimique, d'autres sur la gestion, d'autres sur la sécurité, etc. En fonction des choix de programmes correspondants, ce livre permet, à loisir, de limiter la formation à l'analyse globale, ou bien d'y ajouter une simple initiation à l'analyse locale ou, enfin, de la traiter de manière plus détaillée.

Face à des ambitions pédagogiques aussi variées, le recours à un seul et même ouvrage offre, à nos yeux, un certain nombre d'avantages. En effet, l'étudiant auquel on dispense une formation courte peut ainsi acquérir une perception réaliste de l'étendue du domaine ; à tout moment de son cursus universitaire, il pourra compléter sa formation en reprenant la lecture de cet ouvrage à l'endroit où il l'a laissée, avec l'assurance d'une continuité dans la progression ; le praticien, quant à lui, saura à quel moment il lui faudra sous-traiter une question et faire appel à un collègue plus spécialisé. Enfin, et bien qu'il n'ait pas été prioritairement conçu dans ce but, ce livre, nous l'espérons, pourra être également utile aux professionnels déjà expérimentés. Pour ce public particulier, nous suggérons le mode d'emploi suivant : commencer par l'étude du ou des chapitres de la seconde partie qui l'intéresse, puis, en fonction des difficultés rencontrées, revenir à l'étude des chapitres correspondants de la première partie.

© Lavoisier – La photocopie non autorisée est un délit